

EFFECTOS DEL BOMBEO SOBRE LA CALIDAD QUÍMICA DEL ACUÍFERO COSTERO EN EL SECTOR NORTE DEL PARTIDO DE LA COSTA. BUENOS AIRES

Silvina CARRETERO^{1,2}, Santiago PERDOMO^{2,3}, Eduardo KRUSE^{1,2}

¹Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), 64 n° 3, 1900 La Plata, Argentina.

Tel: +542214249049, int 14. scarretero@fcnym.unlp.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

³Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP), Paseo del Bosque s/n. (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

En el sector norte del Partido de La Costa se analizó la calidad química del agua subterránea en el área de captación de la cooperativa prestadora de servicios. Se evaluó el impacto del bombeo con el objeto de lograr un manejo sustentable del recurso hídrico. Se ejecutaron pozos de reconocimiento profundos, se instaló una red de monitoreo y se tomaron muestras de agua para análisis químicos. Se instalaron sensores de registro continuo en los pozos y se realizó una tomografía eléctrica. Se reconoce una zonación química en profundidad con el límite a los 6 m. Se diferencian aguas bicarbonatadas cálcicas por arriba de este límite (zona A) y cloruradas sódicas por debajo (zona B) cuya concentración de aniones y cationes supera los límites de potabilidad. En el sector donde la extracción de agua es más intensiva se ha detectado un desmejoramiento de la calidad química debido a la salinización de los pozos con agua proveniente de la zona B. Este fenómeno fue detectado por todas las metodologías utilizadas. La tomografía eléctrica permitió dimensionar arealmente la situación puntual definida por los pozos individuales. Se han observado una serie de recomendaciones a los prestadores de servicios para un manejo más eficiente del recurso.

Palabras clave: zonación química, agua subterránea, monitoreo, manejo del recurso hídrico.

ABSTRACT

In the northern sector of the Partido de La Costa the chemical quality of groundwater in the extraction area managed by the water supplier cooperative was analyzed. The impact of pumping was evaluated with the aim of sustainable water resources management. Deep wells were drilled, a monitoring network was set up and water samples were taken to carry out chemical analysis. Water level data loggers were installed and an Electrical Resistivity Tomography was carry out. A chemical zonation was recognized in depth of which limit can be found at 6 m. Above these limit (zone A) there is calcium-bicarbonate type water and below (zone B) there is sodium-chloride type water which concentration of anions and cations exceed the limit for drinking water regulations. In an area where an intensive pumping is carry out a deterioration in the groundwater chemical quality, due to well salinization with groundwater coming from zone B, was detected. This phenomenon has been detected by all the applied methods. The Electrical Resistivity Tomography allowed to understand the areal representation of a punctual situation defined by individual wells. A series of recommendations for a more efficient water resources management were given to the water suppliers.

Keywords: chemical zonation, groundwater, monitoring, water resource management.

INTRODUCCIÓN

Los acuíferos alojados en las dunas costeras constituyen reservorios de agua dulce que pueden resultar la única fuente de abastecimiento a poblaciones (Custodio 2010). El riesgo potencial de intrusión salina es un factor

a tener en cuenta en la gestión de un acuífero costero. La planificación a largo plazo es más una excepción que la regla, lo cual se relaciona, entre otras causas, con la falta de conocimiento del sistema (Cheng and Ouazar 2004). En general, la planificación comienza cuando un problema de intrusión salina ha sido detectado o se percibe el



riesgo en un futuro inmediato. Usualmente en los ambientes costeros la contaminación del agua dulce con agua salada proviene de la intrusión de agua marina en el continente, pero dependiendo las características químicas del acuífero, también se puede producir desde niveles más profundos.

A nivel internacional existen programas destinados a definir las pautas de uso sustentable como el United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization-International Hydrological (UNESCO-IHP). Dicho programa tiene como objetivo revertir las tendencias a la sobreexplotación y degradación de la calidad de los acuíferos costeros. También, como parte del protocolo de Manejo Integrado de Zonas Costeras (ICZM) en el Mediterráneo se requiere que los acuíferos costeros sean monitoreados para prevenir los efectos negativos de la extracción del agua subterránea (UNEP-MAP, UNESCO-IHP, 2015).

En la localidad de San Clemente del Tuyú, Partido de La Costa, Buenos Aires, se está realizando un estudio para evaluar el recurso hídrico en el predio asignado a la Cooperativa prestadora de servicios. Se analizó la calidad química del agua subterránea en el área de captación y se evaluó el impacto del bombeo con el objeto de lograr un manejo sustentable del recurso hídrico.

MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio corresponde a la costa arenosa de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (San Clemente del Tuyú, Partido de la Costa) (Figura 1). Se trata de una franja costera con un ancho de 2 km, que cubre una superficie aproximada de 15 km².

El clima es templado húmedo, la precipitación media anual oscila entre los 900 y 1000 mm. El 60% de las lluvias se produce en los meses con mayor evapotranspiración (cálidos) por lo que la mayor recarga del agua subterránea se da durante la estación fría siendo del orden de 430 mm/año (Carretero y Kruse 2012).

El acuífero principal de agua dulce está constituido por arenas de médanos superpuestas a arenas de barrera marina con un espesor promedio de 10 m y está limitado por dos interfaces, hacia el continente agua dulce-agua salobre y hacia el mar, agua dulce-agua salada (Carretero 2011). Se reconocen dos ambientes geomorfológicos, el cordón costero y la llanura deprimida. El cordón costero se caracteriza por agua subterránea de baja salinidad principalmente del tipo Ca-HCO₃. La llanura deprimida se desarrolla al oeste del cordón costero con cotas inferiores a 5 msnm, predominan los materiales limosos y arcillosos y contiene agua de elevada salinidad, tipo Na-Cl (Carretero et al. 2013). El espesor del acuífero se ve limitado por una zonación química y un gradiente vertical de la conductividad eléctrica la cual se incrementa abruptamente entre los 5-7 m de profundidad (Carretero

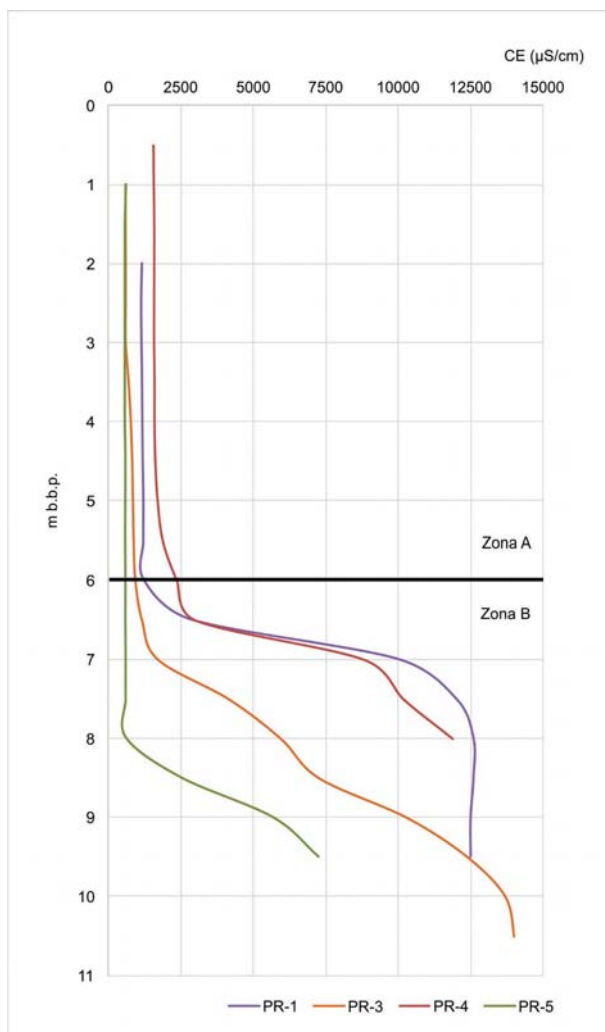


Figura 2. Perfil de conductividad eléctrica (CE) para los pozos de reconocimiento (PR). Carretero, Perdomo y Kruse.

et al. 2016).

En la región la actividad económica dominante es el turismo siendo el uso del agua casi exclusivamente para consumo humano y recreativo. La población, que depende del acuífero costero para el suministro de agua, se incrementa notablemente durante el verano. En San Clemente del Tuyú el abastecimiento de agua potable se realiza a partir de un campo de bombeo situado hacia el sur de la localidad, fuera de la zona urbanizada. La explotación se realiza a través de 7 pozos Ranney (caudal 7 m³/h) y 21 sistemas wellpoint (caudal 13 m³/h) ubicados en el cordón costero. La profundidad de extracción oscila entre 4 y 6 m, con una distancia entre los pozos de 25 m. Para evitar fenómenos de interferencia se operan de manera alternada, aunque en verano debido a la mayor demanda suele no respetarse este régimen. La producción promedio fuera de los meses de verano es de alrede-

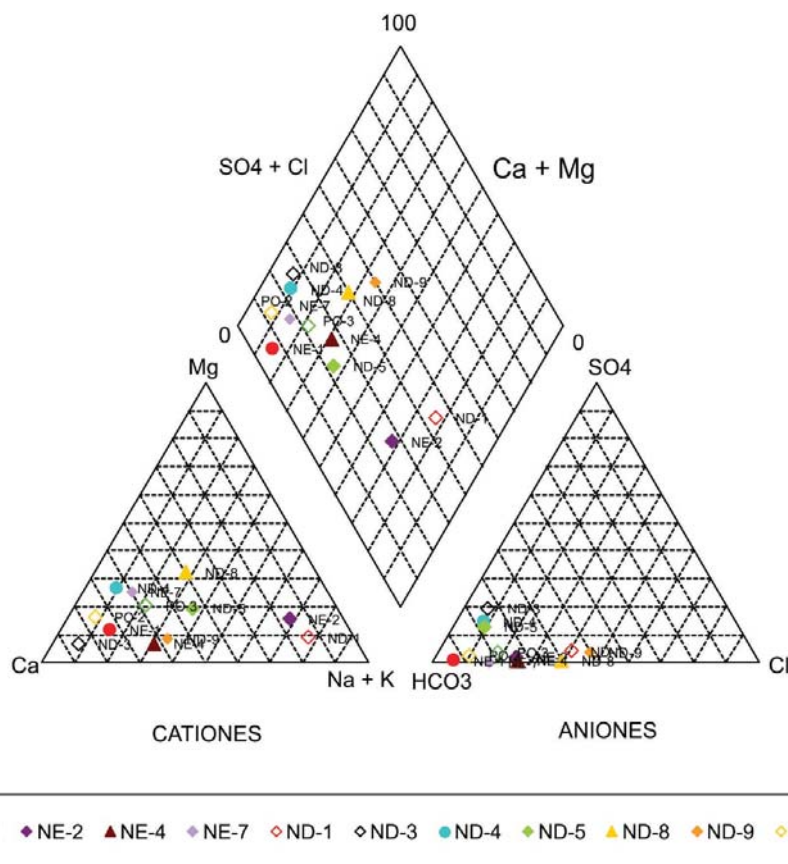


Figura 3. Diagrama de Piper para las muestras colectadas en los freáticos a 4 m de profundidad. Carrretero, Perdomo y Kruse.

dor de 500 m³/d. Para diciembre y marzo es 800 m³/d mientras que en enero y febrero aumenta a 1500 m³/d con algunos años superando los 1800 m³/d, con lo cual se observa que en temporada se triplica la extracción.

Metodologías

Se ejecutaron cinco pozos de reconocimiento (PR) que abarcan el espesor total de la unidad acuífera. Dichos pozos fueron diseñados con cañería ranurada en la totalidad de su extensión para permitir el normal funcionamiento del flujo subterráneo. Se instaló una red de monitoreo en el campo de bombeo con pozos para evaluar el nivel estático (NE) y el dinámico (ND) colocando caños ranurados que alcanzan una profundidad de 6 m. Cada PR cuenta con un pozo de observación (PO) ubicado a 5 m de distancia con iguales características a los freáticos previamente descriptos.

En marzo de 2015 se realizó un muestreo en la red de monitoreo a una profundidad media de 4m. La obtención del agua subterránea fue mediante un muestreador bailer,

previa purga de los pozos, la cual se llevó a cabo extrayendo el volumen de agua equivalente a 3 o 5 veces el almacenado en el pozo y tomando la muestra luego de la recuperación del nivel freático (U.S. Geological Survey 2006). El agua fue recolectada en botellas de plástico de 2 litros, tapadas y rotuladas.

En los PR se midió la conductividad eléctrica (CE) y profundidad utilizando una sonda Solinst TLC meter para corroborar los valores previos que indicaban la existencia de una zonación química. Luego se realizó el muestreo por medio de una sonda Solinst Discrete Interval Sampler (modelo 425) la cual permite tomar muestras a distintas profundidades. En estos casos, se obtuvo agua subterránea a 10 m.

En el laboratorio se determinaron Sólidos Totales Disueltos (STD), pH, calcio, sodio, potasio, magnesio, hierro total, manganeso, bicarbonatos, cloruros y sulfatos. Los métodos analíticos utilizados se indican en el Cuadro 1. La alcalinidad y dureza fueron obtenidas mediante cálculos. La CE fue medida *in situ* en el campo y se construyó un mapa con los valores obtenidos.

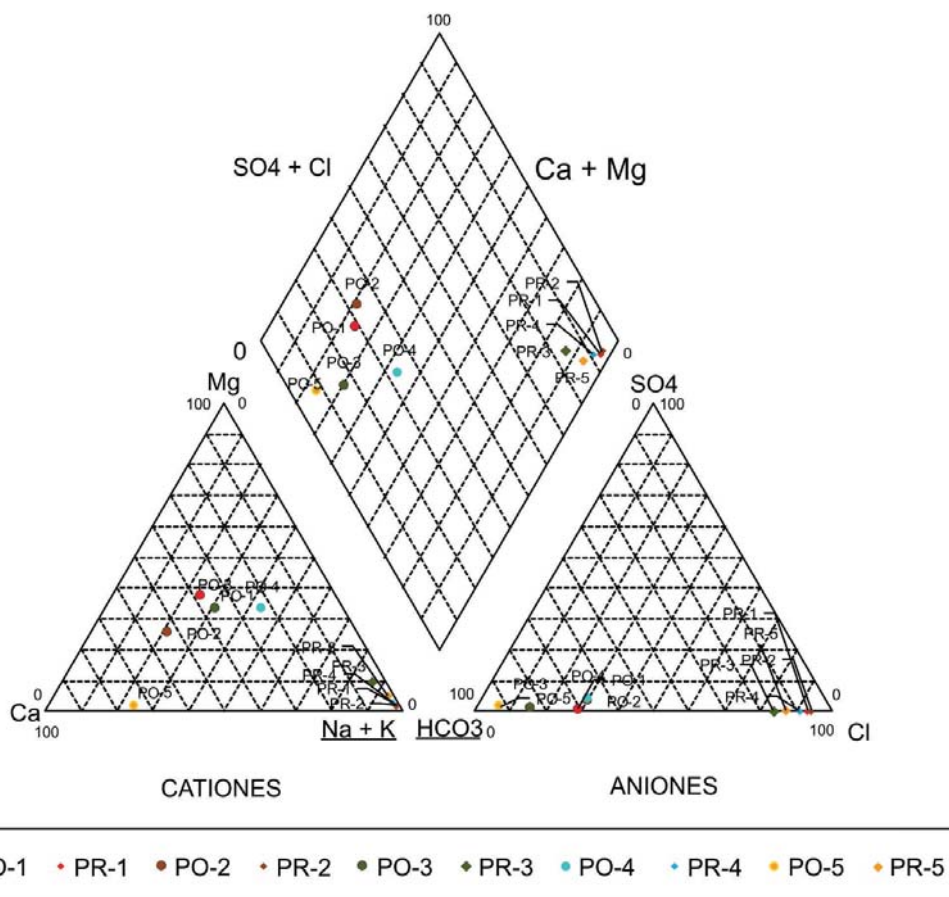


Figura 4. Diagrama de Piper para las muestras colectadas a 4 m de profundidad (PO) y a 10 m (PR). Carretero, Perdomo y Kruse.

Se estimaron los valores medios, máximos y mínimos para cada analito en el conjunto de muestras obtenidas en los freáticos a fines de ser comparados con los resultados de los pozos de reconocimiento. Además, se graficaron diagramas de Piper para clasificar las aguas.

En los pozos ND-4 y ND-8 se colocaron registradores continuos (*divers*) que monitorearon nivel y conductividad durante la temporada (Dic14-Mar15).

Se efectuó una tomografía eléctrica (TE) de 500m en el campo de bombeo con un arreglo Wenner-Schlumberger de 5m de separación entre electrodos. La TE fue medida con un cable multi-electrodo y estacas revestidas en cobre para la energización y las mediciones de la caída de tensión. Los modelos de resistividad obtenidos son en dos dimensiones a modo de perfil. Aumentando la separación entre los dipolos se consigue mayor penetración en el terreno y mediante el traslado horizontal del arreglo se exploran las variaciones horizontales. Los datos

de resistividad aparente obtenidos se ordenan en forma de pseudo sección, que también es necesario invertir para obtener un modelo de resistividades “verdaderas”, cuya respuesta se ajuste adecuadamente a las mediciones. El modelo de resistividades “verdaderas” se obtiene de manera iterativa y, por medio de algoritmos matemáticos desarrollados en el marco los elementos finitos (Loke, 2006), se calcula la respuesta eléctrica que es comparada con los datos medidos. La diferencia entre la sección calculada y las mediciones viene dada por un error medio cuadrático (RMS) que indica la bondad del ajuste. El dispositivo Wenner-Schlumberger posee una adecuada sensibilidad a los cambios de resistividad esperados y la penetración vertical lo hace apropiado para este tipo de estudios hidrogeológicos. La TE permite contemplar las variaciones laterales de la resistividad, además combina mediciones en profundidad, por lo que constituye un estudio de gran detalle.

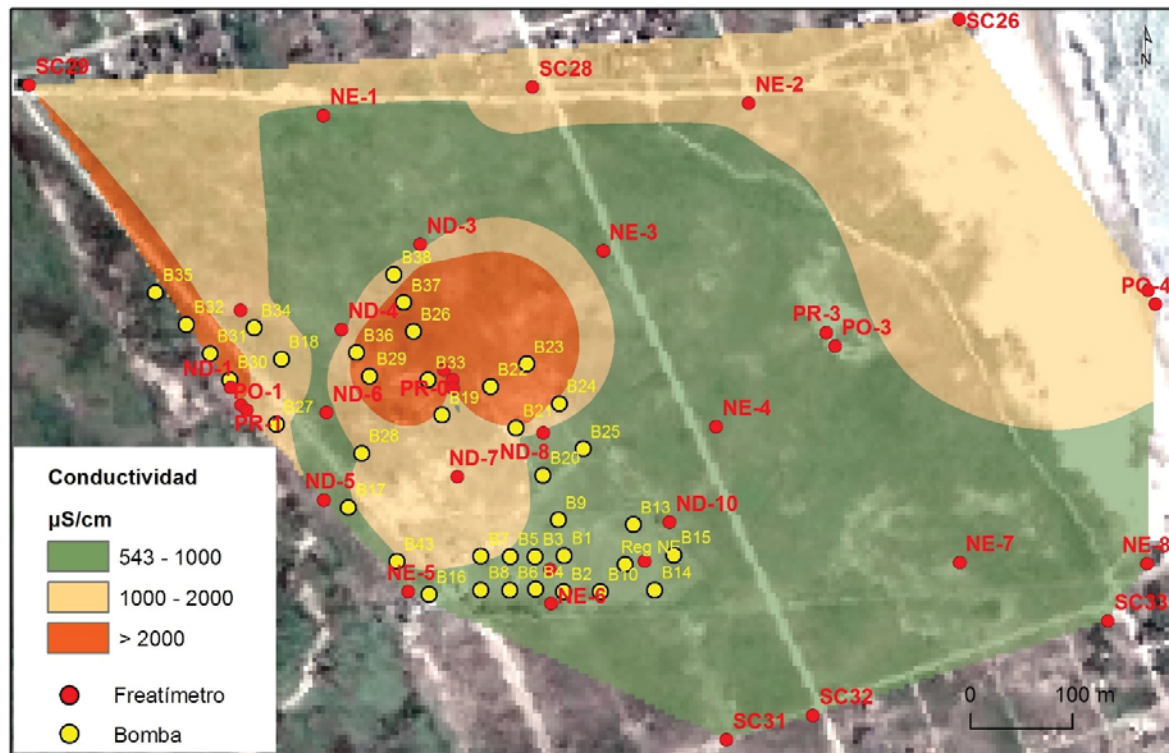


Figura 5. Mapa de conductividad eléctrica en la zona de captación y alrededores. Carretero, Perdomo y Kruse.

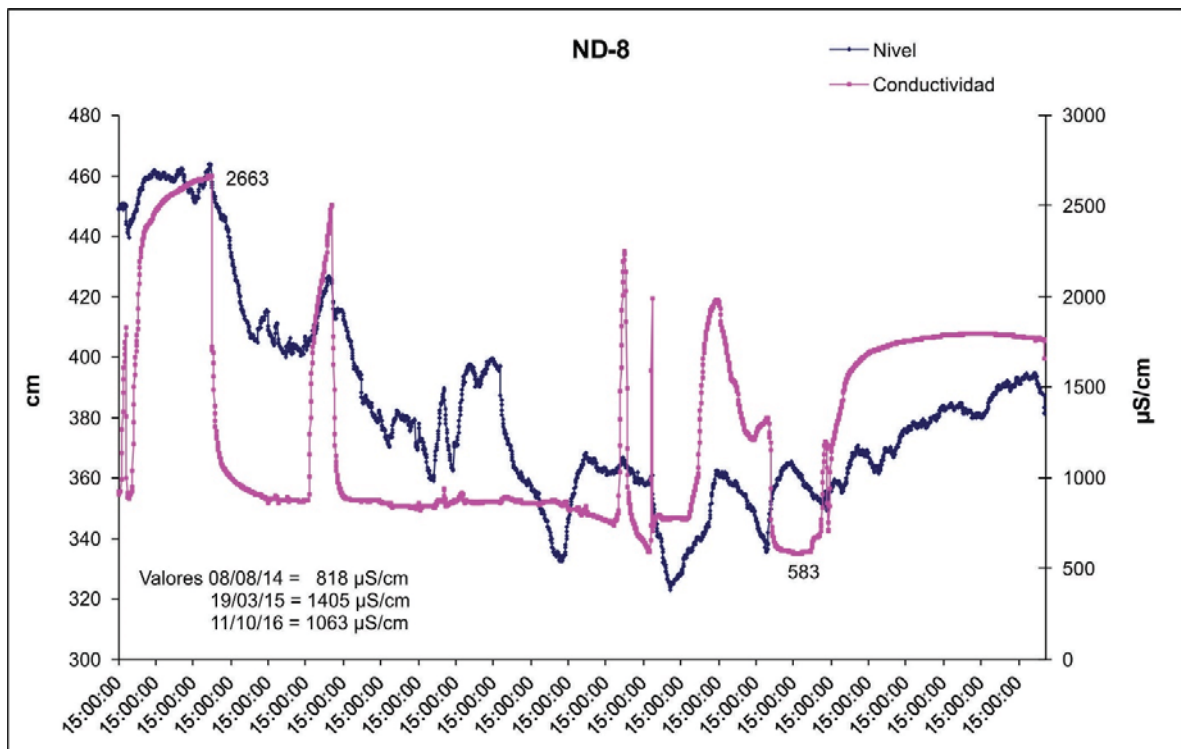


Figura 6. Respuesta del nivel dinámico y conductividad en ND-8 frente al bombeo. Carretero, Perdomo y Kruse.

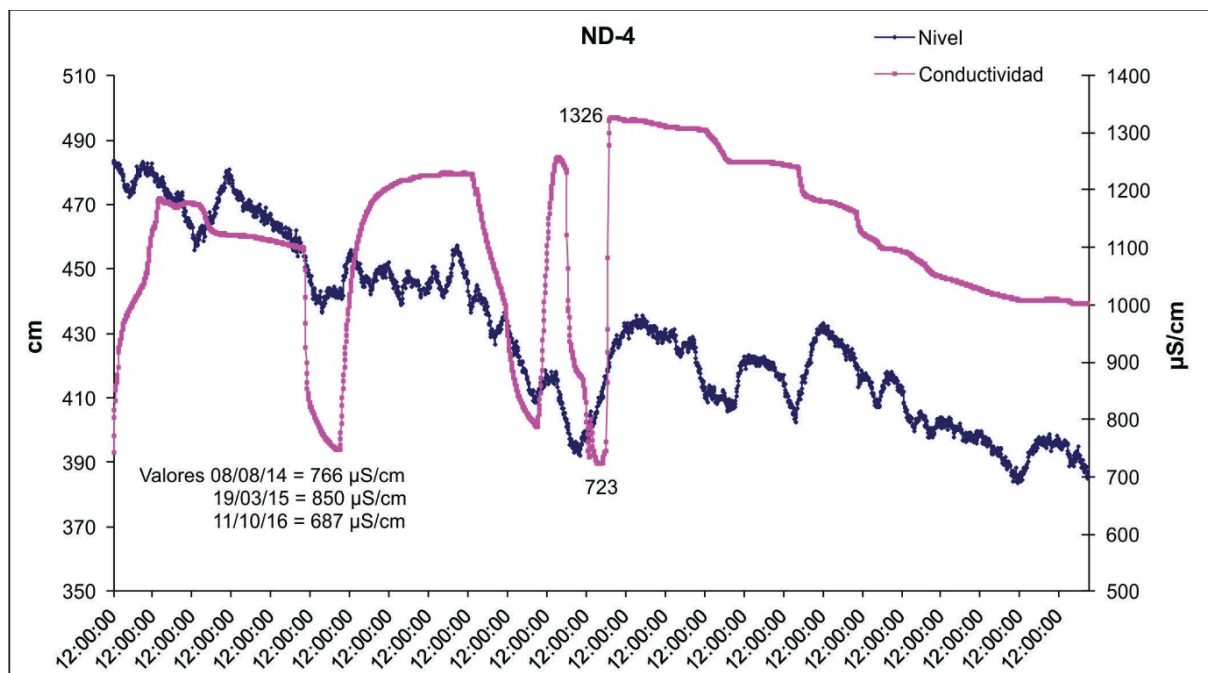


Figura 7. Respuesta del nivel dinámico y conductividad en ND-4 frente al bombeo. Carretero, Perdomo y Kruse.

Cuadro 1. Métodos analíticos utilizados para los análisis químicos, valores mínimos, máximos y media de las muestras tomadas a 4 y 10 m de profundidad.

DETERMINACIÓN	MÉTODO	UNIDADES	PROFUNDIDAD 4 M			PROFUNDIDAD 10 M		
			MÍN.	MÁX.	MEDIA	MÍN.	MÁX.	MEDIA
SDT	SM 2540 C	mg/L	304	1065	587	4490	14880	9604
pH	SM 4500-H+B	u de pH	7.23	7.78	7.5	7.45	7.84	7.7
Potasio	EPA 7610-EAA	mg/L	4	32	16	35.9	42.4	39
Sodio	EPA 7770-EAA	mg/L	31	326	76	1819	11752	6993
Calcio	EPA 7140-EAA	mg/L	33	220	93	47.8	92.1	74
Hierro	EPA 7380-EAA	mg/L	0.1	0.4	0.19	0.5	24.4	7.5
Manganeso	EPA 7460-EAA	mg/L	0.02	0.9	0.12	0.1	0.5	0.3
Magnesio	EPA 7450-EAA	mg/L	1.0	60	27	86.2	123.9	109
Bicarbonato	SM 2320 B	mg/L	330	608	469	1310	2260	1818
Cloruro	SM 4500 Cl-B	mg/L	17	319	93	4190	20785	11839
Sulfato	SM 4500-E Turbidim.	mg/L	3	90	20	1.1	7	4.7
Conductividad	Conductivímetro	µS/cm	728	2702	1125	7000	30700	17520
Dureza	Cálculo	mg/L	162	633	345	479	736	639
Alcalinidad	Cálculo	mg/L	270	498	385	1074	1852	1490

RESULTADOS

Caracterización Hidroquímica

Los perfiles de CE obtenidos en los PR permitieron detectar la existencia de una zonación en profundidad (Figura 2). Se denomina Zona A al sector hasta los 6 m b.b.p. cuyas CE son menores a $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ y Zona B al sector por debajo de esta profundidad con CE superiores. Nótese el que, en general el incremento no es progresivo, sino que se produce un quiebre abrupto en la pendiente de las curvas. Esto indicaría que se trata de una interface en equilibrio que puede ser perturbada fácilmente mediante el bombeo. La clasificación del agua subterránea para los pozos muestreados según Piper (Figura 3) es bicarbonatada cálcica en su mayoría, a excepción de dos pozos que serían bicarbonatadas sódicas.

En la Figura 4 se graficaron los resultados del muestreo de los pozos profundos (Zona B) y sus correspondientes pozos de observación (Zona A). Puede observarse que el agua muestreada a menos de 6 m de profundidad (muestras PO) clasifica como bicarbonatada cálcica mientras que el agua proveniente de mayores profundidades (muestras PR) es clorurada sódica.

Los análisis químicos confirman que la zonación manifestada en los cambios de CE se corresponde con una mayor concentración de cationes y aniones en profundidad. Los valores pueden observarse en el Cuadro 1. La CE media para el agua somera es del orden de $1100 \mu\text{S}/\text{cm}$ mientras que para la más profunda es de $17500 \mu\text{S}/\text{cm}$. Los tenores elevados de Fe y Mn normalmente representan una problemática en la región. Para la Zona A los valores de Fe oscilan entre 0,1 y 0,4 mg/L mientras que en la Zona B lo hacen entre 0,5 y 24 mg/L. En el caso del Mn las concentraciones para las zonas A y B varían entre 0,02 y 0,9 mg/L para la primera y 0,1 y 0,5 mg/L para la segunda. Cabe aclarar que en la Zona A hay

muestras cuyas concentraciones de Fe y Mn se encuentran por debajo del límite de detección del método. La totalidad de las muestras de la Zona B exceden los límites admisibles de Fe y Mn para el agua para consumo humano según el Código Alimentario Argentino (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos 2007) al igual que las concentraciones del resto de los analitos.

Modificaciones en la Calidad Química

El mapa de distribución de la CE (Figura 5) muestra áreas con valores superiores a $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ al momento de efectuado el muestreo. Estos sectores coinciden con la localización de los wellpoint que han realizado una extracción más intensiva durante la temporada siendo utilizados con muy poca rotación.

En los pozos ND-4 y ND-8 los registros de nivel y conductividad muestran que los valores de CE variaron durante la temporada indicando situaciones con tenores superiores a los $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$. En ND-8 (Figura 6) se registraron valores entre 583 y $2663 \mu\text{S}/\text{cm}$. La CE medida antes de la temporada y periodo de monitoreo es del orden de $800 \mu\text{S}/\text{cm}$. Se observa que, en general, el pozo muestra valores superiores durante el periodo de extracción intensiva.

Para el mismo periodo en el pozo ND-4 la CE osciló entre 723 y $1326 \mu\text{S}/\text{cm}$, siendo la media de $768 \mu\text{S}/\text{cm}$. En la Figura 7 puede observarse que en contadas ocasiones los valores de CE se acercan al valor medio, manteniéndose por encima de los $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$.

La tomografía eléctrica (Figura 8) presenta un largo de 500m y atraviesa transversalmente el campo de bombeo. Sobre el eje horizontal se indica las posiciones relativas de los pozos de bombeo y los pozos de reconocimiento PR-1 y PR-2.

Puede observarse que la zona superficial, correspondiente a la zona no saturada, presenta una alta resistivi-

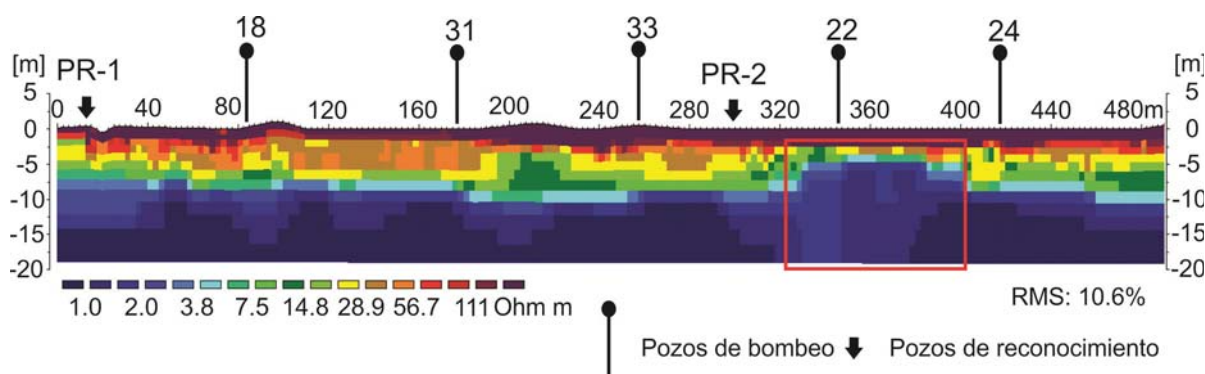


Figura 8. Tomografía eléctrica (TE) realizada en el campo de bombeo. El recuadro rojo señala el sector donde se observa el ascenso del agua salinizada en el área de explotación más intensiva. Carretero, Perdomo y Kruse.

dad (en púrpura y rojo). Por debajo de esta primera zona y hasta una profundidad media de 7m se observan resistividades entre 8-60 Ω m, atribuibles al acuífero de agua dulce. A mayor profundidad la resistividad disminuye considerablemente a valores inferiores a 2 Ω m. En general se observa que en las progresivas próximas a los pozos de bombeo la resistividad de la zona acuífera disminuye (pozos 18, 19 y 24).

Cerca del pozo 22 se observa que las resistividades bajas comienzan a partir de los 5m de profundidad, indicando posiblemente la presencia de agua de mayor salinidad que en los sectores adyacentes. Esta particularidad observada en la tomografía coincide con el sector de mayor CE mapeado en la Figura 5.

CONCLUSIONES

En la unidad acuífera arenosa en explotación existe una zonación química indicada por un aumento en la conductividad eléctrica del agua a partir de los 6 m de profundidad. Se define como Zona A (0-6m) al sector caracterizado por aguas bicarbonatadas cálcicas y Zona B (> 6m) al que presenta aguas cloruradas sódicas. Las concentraciones de la totalidad de los cationes y aniones de la Zona B la convierten en no apta para consumo humano.

Se deben realizar más estudios para establecer el origen de la elevada salinidad que caracteriza a las aguas más profundas. Preliminarmente podría adjudicarse a un pasaje de agua vertical ascendente desde el nivel arcilloso inferior (acuitardo). Estas arcillas son de origen de marismas o lagunas costeras y contendrían agua salinizada. Adicionalmente, se plantea la posibilidad de un flujo más lento debido a una menor conductividad hidráulica consecuencia del incremento del contenido de arcillas en profundidad y menor gradiente hídrico. Esto permitiría un mayor tiempo de residencia del agua en contacto con los sedimentos portadores de agua salada.

Se observa un desmejoramiento de la calidad química del agua en el área de captación con una extracción más intensiva. Durante el bombeo se produce una salinización de los pozos proveniente de los niveles inferiores. Este fenómeno ha sido detectado por variadas metodologías: medición de CE *in situ*, registro continuo de CE durante la temporada y por medio de una tomografía eléctrica. Esta técnica ha resultado de gran utilidad ya que permite entender la expresión areal de la situación puntual definida por los pozos. Esto permitiría la realización de un monitoreo de detalle en el campo de bombeo con mayor frecuencia y obteniendo resultados casi inmediatos.

De acuerdo los resultados se pueden realizar una serie de recomendaciones a los prestadores de servicios para un manejo más eficiente del recurso. Se sugiere no colocar filtros más allá de los 5-6 metros de profundidad

como máximo; no incrementar el caudal de bombeo y realizar una rotación más intensiva en el uso de las baterías actuales para evitar el ascenso de agua salobre de los niveles inferiores; y, mantener la misma metodología de explotación (sistema wellpoint) con bombas de bajo caudal.

El monitoreo de las áreas de extracción de agua dulce en acuíferos costeros es de gran importancia, no sólo para la preservación de las reservas sino también de su calidad química. Un desmejoramiento de la calidad conlleva a recurrir a tratamientos para revertir los procesos de salinización que pueden ser detectados de manera temprana mediante un monitoreo sistemático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades y personal de la Cooperativa de Obras y Servicios de San Clemente del Tuyú (COS) por la colaboración brindada durante las tareas de campo y el desarrollo del estudio.

LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Carretero, S. 2011. Comportamiento hidrológico de las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Disponible en http://sedici.unlp.edu.ar/search/request.php?id_document=ARG-UNLP-TPG-0000002075&request=request.
- Carretero, S. y Kruse, E. 2012. Relationship between precipitation and water-table fluctuation in a coastal dune aquifer: northeastern coast of the Buenos Aires province, Argentina, *Hydrogeology Journal* 20:1613–1621.
- Carretero, S., Dapeña, C. y Kruse, E. 2013. Hydrogeochemical and isotopic characterisation of groundwater in a sand-dune phreatic aquifer on the northeastern coast of the province of Buenos Aires. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 49(3): 399-419.
- Carretero, S., Perdomo, S., Kruse, E. y Ainchil, J. 2016. Respuesta eléctrica de la zonación química en un nivel acuífero en la costa arenosa oriental de la Provincia de Buenos Aires. En: García R. y Mariño E. (eds) *Calidad del agua subterránea*, pp 93-100, Editorial Científica Universitaria - Secretaría de Ciencia y Tecnología - Universidad Nacional de Catamarca, San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca.
- Cheng, A. y Ouazar, D. 2004. *Coastal Aquifer Management: monitoring, modeling, and case studies*. Lewis publishers a CRC Press Company, Boca Raton London New York Washington, D.C.
- Custodio, E. 2010 Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeology Journal* 18: 269–280.
- Loke, M. H. 2006. RES2DINV, Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least-square method. Penang, Malaysia: Geotomo Software.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. 2007. Código Alimentario Argentino. Decreto 815/1999 y 4238/1968, resolución 68/2007 y 196/2007. Disponible en: